

УДК 621.317

В. Нічик, студент; Безвесільна О.М., д.т.н., професор, Нечай С.О., к.т.н., доцент

КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЄМНІСНИЙ МЕМС ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

Анотація. Розроблено новий двоканальний ємнісний МЕМС чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації безпілотного літального апарату, в якому точність підвищується за рахунок використання двох каналів та за рахунок фільтрації основної завади - збурюючого вертикального прискорення носія. Збільшується у два рази потужність вихідного сигналу.

Ключові слова: прискорення сили тяжіння, автоматизований гравіметричний комплекс, двоканальний ємнісний чутливий елемент.

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) - багатофункціональний літальний апарат із фіксованим крилом, що дозволяє виконати найскладніші завдання у будь-якому середовищі. БПЛА має такі переваги: надає можливість виконання наземних і морських операцій; має малий термін вводу в експлуатацію; має передові технології захисту від перешкод і шифрування; дозволяє здійснювати різні маневри; забезпечує повністю автоматичні зліт та посадку та ін.

До складу БПЛА входить одна (інколи п'ять) гіростабілізована платформа (ГСП) для виконання функції стабілізації чутливих елементів при проведенні розвідки або корекції артилерійського вогню (військова галузь), при проведенні розвідки корисних копалин (авіаційна гравіметрія). Останній напрямок є надзвичайно перспективним як для військової галузі (корекція інерціальних систем навігації рухомих об'єктів), так і в геології та геофізиці (розвідка корисних копалин та ін.). Ефективність виконання функцій БПЛА великим чином залежить від досконалості (зокрема, точності) чутливого елемента системи стабілізації БПЛА.

Автоматизована система стабілізації (СС) зображена на рис.1. [1] На ній встановлюється чутливий елемент (у нашому випадку це прилад для вимірювання прискорення сили тяжіння (ПСТ) або гравіметр). У подальшому будемо називати цей прилад двоканальний ємнісний МЕМС гравіметр (ДЕГ).

СС АГС забезпечує збіг вимірювальної осі ДЕГ із довідковою вертикаллю. ДЕГ встановлюється на горизонтальну стабілізовану платформу, яка складається з двох лінійних акселерометрів та спеціальних двигунів [1]. ГСП орієнтована у географічній системі координат. Осі чутливості акселерометрів спрямовані на північ та на схід. Їх вихідні сигнали f_y , f_x матимуть вигляд [2]:

$$f_x = -(2\dot{r}\dot{\varphi}_c + r\ddot{\varphi}_c) \cos \chi + (\ddot{r} - r\dot{\varphi}_c^2) \sin \chi - 2r\omega_3\dot{\lambda} \cos \varphi_c \sin \varphi - r\dot{\lambda} \cos \varphi_c \sin \varphi + \aleph g; \quad (1)$$

$$f_y = 2r\dot{\varphi}_3\omega_3 \sin \varphi_c + 2r\varphi_c\dot{\lambda} \sin \varphi_c - 2\dot{r}\dot{\lambda} \cos \varphi_c - r\ddot{\lambda} \cos \varphi_c - 2\dot{r}\omega_3 \cos \varphi_c - \nu g, \quad (2)$$

де \aleph – кут між нормальними до еліпсоїда у меридіональному перерізі та у площині перерізу, перпендикулярного площині меридіана; ν – кут між нормальними до геоїда у меридіональному перерізі та у площині перерізу, перпендикулярного

площині меридіана; φ – географічна широта; φ_c – геоцентрична широта; χ – відхилення від вертикалі; λ – довгота місця.

Отримані сигнали надходять до блоку керування (БК), де формується керуючі сигнали для двигунів. Вони виставляють ГСП у нульове положення.

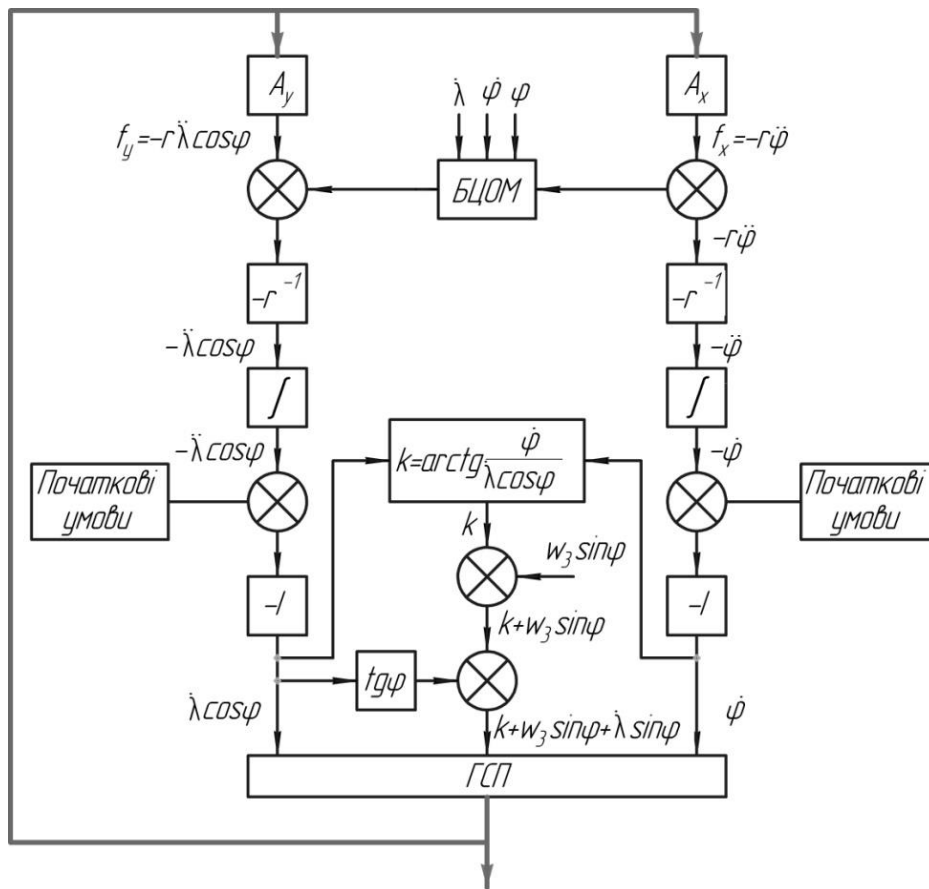


Рис. 1. Блок-схема системи стабілізації

Якщо ГСП виставлена абсолютно точно у положення вертикалі, то горизонтальні компоненти ПСТ дорівнюють нулю. Тоді, враховуючи $\mathcal{N} g = -v g = 0$, БК буде компенсувати такі складові:

$$f_x \Rightarrow 0 = 2r\omega_3 \dot{\lambda} \cos \varphi_c \sin \varphi - r\dot{\lambda} \cos \varphi_c \sin \varphi; \quad (3)$$

$$f_y \Rightarrow 0 = 2r\dot{\varphi}_3 \omega_3 \sin \varphi_c + 2r\varphi_c \dot{\lambda} \sin \varphi_c - 2\dot{r}\dot{\lambda} \cos \varphi_c - 2\dot{r}\omega_3 \cos \varphi_c. \quad (4)$$

Нехтуючи складовими другого порядку та прийнявши відхилення від вертикалі рівним нулю, будемо мати:

$$f_x = -r\ddot{\varphi}_c; \quad (5)$$

$$f_y = -2r\ddot{\lambda} \cos \varphi_c. \quad (6)$$

Після проведення певних математичних операцій (множення на r^{-1} , інтегрування і зміни знаку) над сигналами f_y і f_x , на виході відповідних каналів отримаємо $\dot{\varphi}$ та $\dot{\lambda} \cos \varphi$ (рис. 1). Сигнал $\dot{\varphi}$ використовується для керування ГСП відносно осі, спрямованої на північ (x), а сигнал $\dot{\lambda} \cos \varphi$ - для керування відносно осі, спрямованої на схід (y).

Сучасні тенденції зменшення масогабаритних параметрів автоматизованих гравіметричних комплексів (АГК) пов'язані з необхідністю використання в якості носіїв малогабаритних літальних апаратів, зокрема БПЛА. Мікроелектромеханічні системи та технології (МЕМС) поєднують у собі мікроелектронні і мікромеханічні компоненти. У роботі використано чутливий елемент ГСП, що об'єднує електричні та механічні елементи у одну мікромініатюрну систему, має можливість обміну інформацією з іншими приладами та системами АГК через запрограмований комп'ютерний блок керування (БК). Цей прилад – двоканальний ємнісний МЕМС чутливий елемент або ДЄГ. Він має значні переваги перед іншими відомими чутливими елементами АГК [2]: забезпечує високу точність, мале енергоспоживання, малий розмір, функціональність (злагоджена єдина система) і нижчу вартість, ніж у подібних дискретних механічних схем. Компоненти МЕМС, як правило, мало сприйнятливі до зовнішніх агресивних впливів. Конструкції та особливості роботи ємнісних МЕМС акселерометрів, які можна використовувати в якості гравіметрів гравіметричних комплексів, детально описано в [1].

Принцип роботи полягає у тому, що ПСТ перетворюється у зміну зазору між пластинами, а далі – у зміну вихідної напруги. На кафедрі приладобудування КПІ ім. Сікорського розроблено та досліджено двоканальний ємнісний МЕМС гравіметр (ДЄГ) (рис.1.) [1].

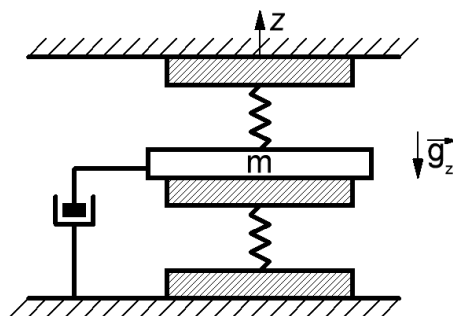


Рис.1. Принципова схема ДЄГ[1]

Чутливий елемент ДЄГ розміщений у герметичному корпусі і виконаний у вигляді верхньої та нижньої металевих обкладинок, розділених діелектриком. Верхня металева обкладка з'єднана з герметичним корпусом, а нижня — через ізолятори із пружною мембраною, до якої прикріплена сейсмічна маса. Ці обкладки, розділені діелектриком, утворюють конденсатор зі змінним зазором δ та ємністю q . Під час дії ПСТ g_z на сейсмічну масу виникає сила тяжіння, яка зумовлює її рух [1]. Унаслідок такого руху пружна мембрана починає згинатися, чим змінює зазор δ між верхньою та нижньою металевими обкладинками, розділеними діелектриком, а отже, і ємність q , яка обернено пропорційна прискоренню g_z . Параметри чутливого елемента ДЄГ підібрані так, що частота його власних коливань дорівнює найбільшій частоті ПСТ, яка може бути виміряна на фоні завад. Тобто, чутливий елемент ДЄГ виконує також функції фільтра низьких частот.

Основні переваги ДЄГ: лінійність, малі габарити та вага, висока чутливість, стійкість показань, висока точність [1, 3].

Розглянемо коливальну систему одного ємнісного гравіметра (ЄГ), представлену на рис. 2, де позначено: конденсатор – С, інерційна маса (ІМ), коефіцієнт пружності k та демпфуючий елемент (ДЕ). У якості демпфуючого елемента виступає повітря, що створює опір рухові ІМ. Елемент жорсткості характеризується пружними властивостями ЄГ.

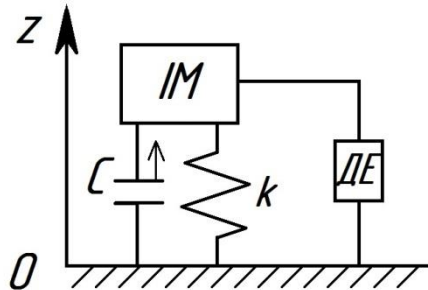


Рис. 2. Коливальна система ЄГ [1]

Запропонована схема є справедливою за наступних умов:

- рух ІМ розглядається в інерціальній системі відліку і відбувається лише в одному напрямку – вздовж осі 0-z, перпендикулярної площині встановлення ЄГ;
- опора, ІМ та інші складові ЄГ є недемпфованими;
- маса пружного елемента набагато менша за ІМ;
- у межах можливих коливань, сила пружності пропорційна деформації пружного елемента.

Під час руху ІМ на неї діють [1] інерційна сила від дії вертикального прискорення БПЛА (F_i), сила опору руху ІМ (F_{op}) та сила пружності (F_{np}):

$$F_i = m \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (7)$$

$$F_{op} = -n \frac{dx}{dt}, \quad (8)$$

$$F_{np} = -kx, \quad (9)$$

де n – коефіцієнт затухання;

k – коефіцієнт пружності пружного елемента;

x – зміщення ІМ ЄГ відносно положення рівноваги.

Відповідно із другим законом Ньютона, рух ІМ із прискоренням g_z забезпечує сила:

$$G = mg_z, \quad (10)$$

де G – сила, яка діє на ІМ; m – величина ІМ.

Кінцеве рівняння руху ЄГ із врахуванням (7) – (10) матиме вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + kx = -mg_z. \quad (11)$$

Зважаючи на інерційність конструкції ЄГ, двома першими складовими у рівнянні (11) будемо нехтувати.

Отримаємо [1]:

$$kx = -mg_z. \quad (12)$$

Отже, рівняння руху одноканального ЄГ в умовах установки на Землі, буде:

$$g_z = -\frac{\kappa}{m} x.$$

Вихідна напруга одноканального ЄГ u_1 буде пропорційна зміщенню ІМ x . Вихідний електричний сигнал одноканального ЄГ буде

$$u_1 = k(mg_z).$$

Для двоканального ємнісного гравіметра або ДЄГ на ємнісні елементи обох каналів діє прискорення сили тяжіння g_z . Для ДЄГ вихідні сигнали двох ЄГ будуть:

$$u_1 = k(mg_z); \quad (13)$$

$$u_2 = k(mg_z), \quad (14)$$

де u_1 – вихідний електричний сигнал ємнісного елементу ЄГ1 одного каналу,
 u_2 – вихідний електричний сигнал ємнісного елементу ЄГ2 другого каналу,
 m_i – інерційна маса у кожному каналі.

Вихідні електричні сигнали u_1 та u_2 ємнісних елементів обох каналів сумуються у суматорі, а залишкові похибки компенсуються (так як вони з різними знаками). Отже, додавши (13) та (14), матимемо:

$$u_\Sigma = u_1 + u_2 = 2kmg_z, \quad (15)$$

де u_Σ – вихідний сигнал підсилювача.

Тобто, з врахуванням (15) та (12) для ДЄГ рівняння руху в умовах установки на Землі, буде:

$$kx = -2mg_z. \quad (10)$$

Таким чином, у роботі показано, що, завдяки використанню двоканального ДЄГ, досягнуто посилення вихідного сигналу у 2 рази та підвищення точності шляхом скасування залишкових похибок оскільки вони будуть з різними знаками у виразі (15) [1].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [4] Безвесільна О. М. Двоканальний МЕМС гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи: монографія / Безвесільна О.М., Хильченко Т.В. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ДП НВЦ «Пріоритети», 2017. – 181 с.
- [5] Безвесільна О. М. Прецизійний приладовий навігаційний комплекс та його чутливі елементи. Монографія / Безвесільна О.М. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ДП НВЦ «Пріоритети», 2019. – 451 с.
- [6] Bezvesilna O. Introducing the principle of constructing an aviation gravimetric system with any type of gravimeter [Text] / O. Bezvesilna, A. Tkachuk, S. Nechai, L. Chepyuk, T. Khylychenko // Eastern-European journal of enterprise technologies 1/7 (85) 2017 P.-45-56.

Наук. керівник: д.т.н., проф. Безвесільна О.М.